樹脂ペレット飢餓供給時における連続可塑化過程の可視化解析

高 次 聡^{*1}・横 井 秀 俊^{*2}

Visualization Analysis on Continuous Plastication Process of Resin Pellets under Starve Feeding Condition

Takatsugi, Satoshi^{*1}/Yokoi, Hidetoshi^{*2}

To investigate the influence of the pellet starve feeding condition on the continuous plastication process with PP (hot cut pellet), in this study, visualization analysis was performed and plastication mechanism under the pellet starve feeding condition was revealed. It was confirmed that both the pellet gathering point and the melting start point under the starve feeding process relatively moved to the downstream region along the screw compared to one under the pellet flood feeding, and also this phenomenon was encouraged by increase in the starvation ratio and the screw rotation rate. Also confirmed that although the melting completion point in a low screw rotation rate was located almost at same point as one under the flood feeding, the melting did not complete in a high screw rotation rate accompanied with generation of solid bed break-up.

According to the results, the following plastication process under the starve feeding condition was suggested. The resin pellets are transported with a low filling density through the upstream region of the feed zone, to aggregate in the downstream region while they are heat-receiving and rolling. When the pellets those surfaces are heated at the compression zone have been integrated by aggregation, they enclose a high temperature interface between each of them. Hence the melting completes in a short period of time without any obvious generation of the melt pool (MP). Although the pellets are molten efficiently in a low screw rotation rate under the starve feeding condition, increase in the screw rotation rate results in a delay in the plastication process, and it can lead to poor melt failure and generation of the solid bed (SB) break-up (BUP).

Key words : visualization cylinder, plastication process, starve feeding, extended image

1. 緒 言

射出成形機において、加熱シリンダ内への樹脂ペレットの嚙込み状況およびその後の可塑化スクリュによる樹脂ペレットの輸送状況は、可塑化・計量過程に大きな影響を与え、成形品の品質を左右する。精密な成形を行うためには、それらの安定化が重要な課題である。著者らはホッパー下部における樹脂ペレットの嚙込み状況の影響を調査するため、シリンダ内とホッパー下部嚙込み領域を直接観察できる可視化加熱シリンダ¹⁾を用いて、7種類の樹脂ペレットの嚙込み挙動とスクリュ表面温度、ペレットの固体摩擦係

数との相関解析を行い、特定のPBTにおける嚙込み不良現象の生成機構を明らかにした²⁾。これまで、射出成形機に樹脂ペレットを飢餓供給することで、嚙込み不良が改善する事例があることは経験的に知られていた。飢餓供給は、通常の満杯供給に対して、可塑化スクリュ本来の固体輸送能力を下回るように樹脂ペレット量を制限し、ホッパー口から供給する方法である。飢餓供給は一般的に可塑化能力低減という短所を持つものの、樹脂ペレットの嚙込み性向上、脱気性向上に効果があることが商業的に謳われ、現象の解明がなされていない中で、経験的には有効性が知られている。しかしながら、押出機における添加剤の混練性改善³⁾、射出成形機における脱気性向上⁴⁾などの対策手段として紹介された報告はなされているものの、飢餓供給時の樹脂可塑化プロセスについては、これまで明らかにされていなかった。

そこで本研究では、既報¹⁾の可視化加熱シリンダを用いて飢餓供給時の可塑化状況を観察し、同時にシリンダ内の樹脂圧力、樹脂温度を測定することで、飢餓供給時の可塑化メカニズムを詳細に調査することを目的とした。

^{*1} ファナック(株)ロボマシン事業本部
Robomachine Business Div., FANUC Corporation
山梨県南都留郡忍野村 (〒401-0597)
Oshino-mura, Minamitsuru-gun, Yamanashi, 401-0597, Japan
takatsugi@fuji.email.ne.jp

^{*2} 東京大学生産技術研究所
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
東京都目黒区駒場 4-6-1 (〒153-8505)
4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505, Japan
2016.8.8 受理

2. 実験方法

2.1 飢餓供給の方法

固体樹脂の噛込み不良現象が発生した場合の有効な対応策として、ホッパー口へのペレット定量供給装置を用いて、飢餓供給を行うことが知られている。ここでは、飢餓供給の度合い(以下、飢餓率)を変化させて、飢餓供給時のホッパー下部およびシリンダ内における樹脂挙動を調査する。ここで、飢餓率は、次式で与えられる⁵⁾。

$$S = (1 - G_s/G_0) \times 100 \quad (1)$$

S : 飢餓率 (%)

G_s : 飢餓供給時の樹脂質量流速

G_0 : 満杯供給時の樹脂質量流速

ここで、 G_s 、 G_0 はともに同一のスクリュ回転速度におけるスクリュ軸方向の質量流速である。また満杯供給とは、定量供給装置からの樹脂送り出し量がノズルからの可塑化吐出量に等しいか、それ以上となる供給状態のことを指し、以下では、満杯供給状態を飢餓率 0% として表記する。

(1)式は成形機のスクリュ回転速度を用いて書き換えると以下のように近似できる⁵⁾。

$$S = (1 - N_0/N_s) \times 100 \quad (2)$$

N_0 : 満杯供給時のスクリュ回転速度

N_s : 飢餓供給時のスクリュ回転速度

ここでは、 N_0 、 N_s のいずれも定量供給装置からの送り出し量は同一とする。定量供給装置の送り出し量を調節して飢餓率を変化させる場合には、(2)式から、

$$N_0 = (1 - S/100)N_s \quad (3)$$

であるから、スクリュ回転速度が N_0 のときに満杯供給となるような定量供給装置の送り出し量に設定すれば、回転速度が N_s のときに飢餓率が S となる。

本研究では、定量供給装置と成形機のホッパー口の間を透明な供給パイプで連結し、スクリュ位置を固定させて回転させる連続可塑化中に、樹脂レベルが一定になるような定量供給装置の送り出し量を求めた。このときを飢餓率 0% とする。飢餓率 0% 時には供給パイプ内の樹脂レベルを一定に保つようにした。これは、ホッパー口におけるペレット自重による加圧効果を考慮したためで、実際にホッパーをつけて可塑化を行う場合とほぼ等価であると考えられる。

本研究では、飢餓率をさまざまに変化させてポリプロピレンのホットカット・ペレット(直径 3 mm×長さ 3 mm; 以下 PPH 3)を供給し、ホッパー下部(成形機正面側、背面側)およびシリンダ内(供給部、圧縮部、計量部)を可視化観察した。同時に、シリンダとノズルにおける樹脂圧力と樹脂温度を計測して可塑化状況の評価を行った。

2.2 実験装置

本研究に使用した可視化加熱シリンダの概略を図 1 に示す。ホッパー下部は、ホッパー口部分を形状加工した石英ガラス製ブロックを直接組込み、ホッパー下部におけるシリンダ内への樹脂ペレット噛込み状況を詳細に解析できる構造となっている¹⁾。観察窓部は成形機の正面側と背面側の 2 箇所とし、スクリュのフライト開始端から約 3 ピッチの範囲内のペレット挙動を、両側から同時観察可能となっている。

可視化加熱シリンダを搭載した射出成形機は、型締力 300 kN の AUTOSHOT C-30 A (ファナック株)とした。ガラスブロック内部のペレット挙動は高速ビデオカメラ(HSV-400, 株ナック)にて撮影し、画像処理システム(ID-8000, 株ナック)を用いて、成形機正面と背面側の観察画像をワイプユニットを用いて同一フレーム内に合成・記録した。定量フィーダ (ACCURATE DRY MATERIAL FEEDER, 株クマエンジニアリング)を用いて PPH 3 を飢餓供給し、樹脂圧力と樹脂温度の計測・記録には、樹脂

Fig. 1 Visualization heating cylinder and feed throat

圧センサ (PT 462 XL・PT 465 XL, ダイニスコ(株)) および赤外放射温度計 (150℃～380℃ 用, (株)ニレコ), 計測システム (MOBAC 220, (株)ニレコ) を使用した. 計測位置はノズル部, 計量部, 圧縮部入口の3箇所 (樹脂温度は2箇所) とし, それぞれの計測樹脂圧力を P_n, P_a, P_b , 樹脂温度を T_n, T_a と表記した.

2.3 実験条件

本研究では, PPH 3 (ハイポール J 700, 三井石油化学工業(株)/現プライムポリマー(株), MFR=11 g/10 min, $T_m=165^\circ\text{C}$) を用い, 設定温度はノズルからホッパー下部まで順に 200/210/200/190/190/40 ($^\circ\text{C}$) とした. スクリュを最前進位置に固定しスクリュ回転のみを行う連続可塑性化

を行い, ホッパー下部におけるペレット挙動とシリンダ内の可塑性化状況を可視化観察した. 使用したスクリュは, 呼径 $\phi 22\text{ mm}$, $L/D=20$, 圧縮比 2.2 (供給部谷径 $\phi 13.8\text{ mm}$, 計量部谷径 $\phi 18.2\text{ mm}$), 計量部長さ: 圧縮部長さ: 供給部長さ=4:6:10 のフルフライトスクリュで, 表面に硬質クロムめっきを施した. スクリュ回転速度は 30, 60, 90, 120, 150, 180 (rpm), 飢餓率は 0, 3, 6, 9, 12 (%) と変化させた.

ホッパー下部の可視化観察位置は, 成形機正面側と背面側の両面 (H: スクリュ溝 1~3 ピッチ目), シリンダ内観察位置は, スクリュ供給部 (F 2: 同 6~8 ピッチ目, F 1: 同 8~10 ピッチ目) およびスクリュ圧縮部 (C 2: 同 11~12 ピッチ目, C 1: 同 13~14 ピッチ目), スクリュ計量部 (M 2: 同 17~18 ピッチ目, M 1: 同 19~20 ピッチ目) とした.

3. 可塑性化能力と樹脂温度・圧力変化の計測実験

3.1 可塑性化能力測定結果

可塑性化能力の測定結果を図 2 に示す. 本実験のみ, 定量供給装置の送り出し量を飢餓率 0% のときそのまま一定とし, 可塑性化スクリュ回転数を変化させることで飢餓率を変化させた. そのため, 各送り出し量での計測点は同図の横方向に推移し, スクリュ回転数の変化によらず概ね同じ可塑性化能力を示している. 図 2 では, いずれの飢餓率においても, スクリュの回転速度と可塑性化能力はほぼ比例しており, また同一スクリュ回転速度では, 飢餓率の低い方が可塑性化能力は高くなる様子が確認される.

3.2 樹脂圧力測定結果

可塑性化実験における樹脂圧力変動の抜粋を図 3 に示す. また, 30 秒間の相加平均を図 4 に示す.

図 3 に示すように, いずれの飢餓率でも, 樹脂圧力の変

Fig. 2 Relation between continuous plastication capacity and starvation ratio

Fig. 3 Resin pressure at each measuring point (Screw rotation rate 30, 90, 150 rpm/Starvation ratio 0, 6, 12%)

(1) Mean resin pressure at nozzle P_n

(2) Mean resin pressure at metering zone P_a

(3) Mean resin pressure at compression zone P_b

Fig.4 Mean resin pressure as a function of starvation ratio
(Screw rotation rate 30, 60, 90, 120, 150, 180 rpm)

動幅（最大・最小の圧力差）は P_n が最も小さく、 P_a 、 P_b の順に大きくなった。圧縮部では未溶融ペレット群であるソリッドベッド（以下、SB）が流入し、シリンダ内壁面・スクリュ底面と干渉することを反映して、 P_b の変動幅が増大するものと理解される。スクリュ回転速度の増加に伴って SB の流入量も増加するため、変動幅も大きくなっている。 P_b では、飢餓率 0% の 90 rpm, 150 rpm で、SB のブレイクアップ（以下、BUP）現象^(6,7)を示す特徴的な波形（緩やかな圧力変動）が観察され、特に 150 rpm では、飢餓率 6%、12% の P_b にも BUP 現象の生成を同様に確認することができる。

図 4 から、ノズル部圧力 P_n の平均値は、同一スクリュ回転速度では、満杯供給/飢餓供給を問わず飢餓率とともに微減するが、その値に大きな差は見られない。また、同一飢餓率では、回転速度にともない概ね増加傾向を示した。計量部圧力 P_a は、90 rpm 以下では P_n と同様の傾向を示す。120 rpm 以上では、いずれの回転速度でも満杯供給時に最大となり、飢餓率 3% を除いて、飢餓率とともに漸減傾向を示している。圧縮部圧力 P_b は、いずれの回転速

度でも満杯供給時に最大値を示すが、 P_a と相違して 3% の飢餓供給から急減し、以後、飢餓率の増加とともに緩やかに減少して推移する。これは、 P_b の計測位置が圧縮部入口にあり、後述するように、計測位置における溶融樹脂の充填率が飢餓供給によって低くなることを反映したものと理解される。なお、150 rpm および 180 rpm の P_b は、後述の図 11(2)で示されるように、計測位置が溶融開始点よりも上流側にあったため、溶融樹脂圧力の計測に対応していないことに注意を要する。

3.3 樹脂温度測定結果

図 5 に、可塑化実験における樹脂温度変動（150 rpm）の計測結果を例示する。また、各条件での 30 秒間の樹脂温度変動の相加平均を図 6 に示す。

可塑化中のノズル部、計量部の樹脂温度 T_n 、 T_a は、いずれのスクリュ回転速度においてもほとんど飢餓率の影響を受けず、 T_n では 0~1℃、 T_a では 2~2.5℃ 程度の変動範囲内に収まっていることが確認された。平均樹脂温度の変化を示す図 6 では、ノズル部の樹脂温度 T_n はいずれの飢餓率でもスクリュ回転速度増とともに上昇すること、計量部の T_a は、いずれのスクリュ回転速度でも飢餓率によらず 0.5℃ 以内の範囲に分布するが、飢餓率の増加に伴って各スクリュ回転速度間の変動幅が縮小することが示された。

4. 可視化観察実験

4.1 ホッパー下部の可視化観察結果

ホッパー下部の嚙込み状況を成形機正面側と背面側の両面から同時に観察した結果、以下のような状況が示された。図 7(1)に示す 90 rpm の満杯供給では、ホッパー口から供給された樹脂ペレットは、背面側 1 ピッチ目への落下を開始する（同図 A）。次に正面側 1 ピッチ目への落下が始まり（同図 A'）、直ちにスクリュ回転方向に移動を開始する。2 ピッチ目（同図 B および B'）ではほぼスクリュ溝内一周を隙間なく充填するが、ペレット間に空隙が存在するため、各ペレットは運動の自由度を有する。3 ピッチ目（同図 C および C'）では空隙が消失し、各ペレットが拘束し合った塊となり、剛体のような滑り挙動を開始する。このペレット塊は、スクリュ回転方向速度成分と、スクリュ中心軸方向速度成分を持つ様子が観察された。

次に飢餓供給時の観察画像（90 rpm、飢餓率 6%）を図 7(2)に示す。飢餓供給時に、ペレットはホッパー口から断続的に落下する。正面側ではペレットが充填するには至らず（同図 A）、未充填領域が広がる。背面側でもペレットはスクリュ下方に落下するが（同図 A'）、スクリュ回転にともない押し側フライトに沿うようにペレットが堆積する様子が観察された（同図 B'）。ペレットは背面側に偏った形で堆積し、スクリュ回転方向速度成分を持たないまま下流側へ移送される特徴的な様子が観察された。

比較のため、図 7(3)に 30 rpm、飢餓率 6% 時の観察画像を示す。1~2 ピッチ目でペレットはスクリュ溝内を充填せず、3 ピッチ目（同図 C および C'）で概ね充填するように見える。しかしながら、後述のシリンダ内可視化観察結果から明確になるように、この時点では各ペレット間にまだ空隙が存在し、充填完了していない。

Fig. 5 Resin temperature at each measuring point
(Screw rotation rate 150 rpm/Starvation ratio 0, 6, 12%)

Fig. 6 Mean resin temperature as a function of starvation ratio
(Screw rotation rate 30, 60, 90, 120, 150, 180 rpm)

以上のように、ホッパー下部における可視化観察の結果、飢餓率が低い場合には、スクリュ溝内を埋める樹脂ペレット間に多少の空隙が空いている程度であるが、飢餓率が高い場合には、ホッパー口から供給された樹脂ペレットはまず、スクリュの成形機背面側に充填され、その量が徐々に増加する。やがてスクリュ溝の上側からスクリュ表面に引きずられて成形機正面側に回り込み、溝内を完全に充填す

ることが明らかになった。完全充填までは、正面側からの観察では、ペレットはほとんど見えず、スクリュ下部に少量見えるペレットをスクリュのフライトが下流方向に掻き取っていく様子が見受けられる。このとき、ペレットはスクリュ回転方向速度成分をほとんど持っておらず、溝内を完全充填したのちスクリュ回転方向速度成分を持つようになる。この完全充填位置をFuとすると、ホッパー口からFuまでの距離は、同一スクリュ回転速度ならば飢餓率の増加とともに増加し、同一飢餓率ならばスクリュ回転速度の増加にともない微増する傾向が示された。

4.2 シリンダ内の可視化観察結果

シリンダ内の可視化観察から、飢餓供給時のホッパー下部の観察(図7(3)参照)ではペレットが完全充填されていると思われていたものの、実際にはまだ少し隙間を有しており、個々のペレットには回転等、多少の運動の余地が残されていることが確認された。図1に示す供給部F2(スクリュ6~7ピッチ目)で、個々のペレットは運動の自由度を失い、相互に拘束し合ったペレット塊となる。このときには、各ペレット表面と加熱シリンダ内壁面の接触領域ですでに溶融が始まりかけているものと思われる、やがてペレット表面の溶融樹脂がペレット塊へと含浸し、ペレット間の隙間からスクリュ表面が見えなくなる。ペレット間からスクリュ表面が見えなくなる位置をMsとすると、ホッパー口からMsまでの距離は、同一スクリュ回転速度では飢餓率の増加にともない長くなる。また、同一飢餓率では、90 rpm以下でスクリュ回転速度の増加にともない微増する傾向が見られた。

満杯供給条件下での従来の可視化観察でも、スクリュ回転速度の増加にともない、樹脂の溶融開始位置はノズル側に移行することが確認されている。しかしながら、飢餓率を増加させた場合には、スクリュ溝内でのペレット充填率

Fig.7 Comparison of the visualization images of feed throat under various material-feeding conditions

が供給部で低く保たれる結果、樹脂の押付け圧力の低下による伝熱効果の低下をもたらすこととなる。また、スクリュ中心軸方向への送り速度が速くなるため、シリンダ内での滞留時間も短くなることが想像される。これらより、樹脂の溶融開始位置は、飢餓率増加により一層ノズル側へとシフトすることが示唆された。

4.3 積層擬似展開画像

シリンダ内の可視化観察結果から得られた積層擬似展開画像⁹⁾のうち、スクリュ回転速度 30, 90, 150 rpm について、それぞれ図 8, 図 9, 図 10 に示す。飢餓率 0% の画像を比較すると、スクリュ回転速度 30 rpm では Tadmor 型の、それ以外の回転速度では Lindt 型の溶融状態を呈している。図 8(2)から、30 rpm の飢餓率 6% では、ペレットが充填する位置 Fu が供給部 F 2 に観察される。一方、図 8(3)から、飢餓率 12% では供給部 F 2 にはペレットが存在せず、ペレットが充填する位置 Fu は供給部 F 1 にシフトする。このことから、ペレットのスクリュ溝内充填完了位置 Fu は、飢餓率の増加に伴い、供給部 F 2 から F 1

Fig.8 Extended image of screw channel (30 rpm/Starvation ratio 0%, 6%, 12%)

へと次第に移動することが分かる。しかしながら、溶融が進み Ms、および SB がほぼ消失する位置 Mf は、いずれの飢餓率でもそれぞれ供給部 F 1 と計量部 M 1 である。

図 9 に示す 90 rpm では、全般に供給部におけるペレットの充填が高まる傾向が示される。飢餓率 6% では、供給部 F 2 の上流側（図中右側）でも未充填現象はほとんど確認されない。12% では、30 rpm でほぼ空洞であった供給部 F 2 も概ねペレットが充填している。ペレット充填完了位置 Fu は、30 rpm 同様に飢餓率の増加にともない F 2 から F 1 へと次第に移動する。メルトプール（以下、MP）が発生し SB が薄く透け始める位置は供給部 F 1 である。また、同一飢餓率においては、スクリュ回転速度の増加にともないやや下流側へシフトする傾向が見られるが、飢餓率ほどには影響を与えない。SB がほぼ消失する位置 Mf は飢餓供給時に満杯供給時よりも下流側（図中左側）にシフトするものの、Ms と Mf 間の距離は飢餓供給時の方が短く、短時間の内に溶融が完了することが明らかになった。

図 10 に示すスクリュ回転速度 150 rpm では、飢餓供給時に BUP の発生が確認された。満杯供給時には圧縮部 C

Fig. 9 Extended image of screw channel
(90 rpm/Starvation ratio 0%, 6%, 12%)

2 から C 1 にわたる範囲で SB が薄く透け始めるが、飢餓供給時には C 2 でまだペレットの輪郭が確認され、C 1 に到達したペレットは BUP を引き起こす。この BUP は、回転速度と飢餓率にかかわらずほぼ一定の位置で発生した。満杯供給で BUP が発生していない場合には、M 2 において僅かに SB が確認されるが、M 1 においてはほぼ MP となり溶融が完了した。飢餓率 6 % では、C 1 においても各ペレットの境界が明瞭に確認される。また、SB 内部では、明るい所と暗い所が出現し、局所的に溶融が進んだ領域が形成されつつある。BUP して引きちぎられた SB が M 2 において徐々に薄く溶融し始めるが、M 1 に達してもなお完全には溶融が完了せず、スクリュ溝内では押し側フライト寄りに位置する。溶融が進むにつれて SB はさらに細かく分断されるが、再配置は行われず、スクリュ溝内に広がった溶融樹脂の中に、不均一に分断されたソリッド片が内包されたままの形態で、下流側へと流動する。飢餓率 12 % では、6 % とほぼ同傾向であるが、各部で溶融がいつそう遅延する様子が確認できた。このようにスクリュ高回転速度での飢餓供給は、大幅な溶融遅延現象と顕著な BUP

Fig. 10 Extended image of screw channel
(150 rpm/Starvation ratio 0%, 6%, 12%)

の生成をとまうことが確認された。このため、それによる可塑化樹脂の不均一な溶融状況をもたらすことが示唆された。

5. 飢餓供給における可塑化過程のモデル化

5.1 スクリュ回転速度と飢餓率による可塑化過程の遷移

可視化観察実験結果から得られた飢餓供給時の可塑化プロセスの遷移過程を、満杯供給時と比較しながら図 11 に整理して示す。まず、同図(1)にスクリュ低回転速度 (30 rpm) 時の可塑化プロセスを示す。満杯供給時に比較して飢餓供給時にはペレットがスクリュ溝内に完全充満する地点 (図中 Fu) が大きく下流側 (図中左側) にシフトする。この Fu は飢餓率の増加にとまない、さらに下流側にシフトする。Fu と同様に、Ms も飢餓供給時には下流側にシフトし、飢餓率の増加にとまなってさらに下流側へとシフトする。これに対し、溶融完了点 (図中 Mf) は満杯供給、飢餓供給を問わずほぼ同じ地点 (計量部中間) に位置する。SB の BUP はいずれの条件でも発生しない。

次にスクリュ高回転速度 (150 rpm) 時の可塑化プロセスの遷移過程を同図(2)に示す。全体の傾向は、前述の低回転速度時と同様であるが、満杯供給時のペレット完全充

Fu: The point where pellets fill up screw channel Ms: The point where pellets start melting
Mf: The point where pellets finish melting BUP: Break-up generation point

Fig. 11 Plastication model on the starve feeding process

填位置 Fu 以外、全ての可塑化プロセスは低スクリュ回転速度時に比べてさらに下流側へとシフトする。溶融完了点 Mf はスクリュ計量部の最下流端までシフトし、特に飢餓供給時には計量部内では溶融が完了せず、さらに下流域へと Mf は持ち越される。これとほぼ呼応するように圧縮部下流域から計量部にかけて、SB の BUP が発生する。

5.2 供給部前半におけるペレット挙動モデル

可視化観察実験結果から、飢餓供給時のスクリュ供給部では、樹脂ペレットが満杯供給時のようにペレット塊を形成し剛体のように輸送されるわけではなく、空隙を伴って輸送される挙動を示すことが明らかになった。満杯供給時に、ペレット塊とスクリュ表面との摩擦力がシリンダ内壁面との摩擦より大きくなると、樹脂ペレットの噛込み不良²⁾が発生し、最悪の場合にはペレットが輸送されなくなる現象を誘発することが経験的に知られている。ところが、飢餓供給時には、可視化観察結果に示されたように、樹脂ペレットは圧縮部近傍まで凝集せず、スクリュ表面の摩擦力は低いままに回転・並進運動するため、満杯供給時に見られるペレット塊とスクリュ・シリンダ壁面との摩擦

力のバランス欠如に起因する噛込み不良現象を回避することが可能となることが示唆された。

5.3 スクリュ低回転速度時の溶融モデル

可視化観察実験結果より、満杯供給時に比べて飢餓供給時の Ms は遅延するものの、Mf はほぼ同じ位置となっていることが明らかになった。既報^{1),2)}より、満杯供給時の供給部では、剛体のように移動するペレット塊が、シリンダ内壁面上に押し付けられ螺旋状の軌跡を描きながら接触・移動することが明らかになっている。本実験結果から、飢餓供給時の供給部ではネジ送りのようにシリンダ底面を滑るように直線的に輸送される様子が観察されたため、満杯供給時に比べて相対的にシリンダ内壁面からペレットへの伝熱量の低下因子となっていることが示唆される。一方で、満杯供給時にはペレット塊の外表面（接触領域）のみが局所的に加熱されるが、可視化観察で示されたとおり飢餓供給時には各ペレットが転がりながら移動するため、輻射伝熱効果と併せてペレット表面を効率よく均一に加熱できることが推察される。このため、供給部を通過する時間が比較的長いスクリュ低回転速度におけるペレット凝集時

には、SB 内の各ペレット界面は相対的に高温であり、スクリュ軸方向への移動では短い距離で溶融が完了するものと考えられた。

5.4 スクリュ高回転速度時の溶融モデル

前述のスクリュ低回転速度時には、効率的な溶融が行われるものの、スクリュ高回転速度時には、ペレット凝集後の SB の軟化・溶融が大幅に遅延し、満杯供給時と同様に BUP の発生が観察された。圧縮部を経て計量部に至っても未溶融のペレット (BUP 片) が多く存在することとなり、飢餓率が高いほど溶融不良を伴いやすことが明らかになった。これらは、ペレット凝集前までのペレット表面への伝熱量が少ないことに起因すると推察される。

BUP 生成のメカニズムは以下のように考察される。飢餓供給時に圧縮部に到達したペレットは、上述したペレット表面への伝熱効果に加えて、ペレット充填密度が低く、ペレット間の隙間が大きい状態で分布している。これにより、圧縮部でのペレット凝集時の SB 凝集力は低下する。圧縮部でスクリュ溝深さが減少するにともなう、SB はシリンダとスクリュ表面に挟まれ、高速回転時にはシリンダとの接触部には急激な局所的溶融が開始される。この溶融樹脂は、通常の満杯供給時の可塑化過程ではメルトフィルムを形成しつつ押し側フライトに掻き取られて MP を形成するが、飢餓供給時にはフライトに掻き取られる前に、SB のペレット間に形成された緩い隙間に選択的に強制侵入する。この SB の凝集力は低いため、溶融樹脂はこうした隙間 (図 10(2)、同図(3)の C1 に観察される SB 内の白い領域) を拡大するように流入し続け、結果として SB に BUP を生成させた。この間、MP を形成するには至らない。そのため、高回転速度時には、圧縮部を経て計量部に至っても未溶融のペレット (BUP 片) が多く存在することとなり、飢餓率が高いほど溶融不良を伴いやすと推察される。

6. 結 言

本研究では、PPH3 (ホットカット PP) を用いて可塑化実験を行い、飢餓供給が可塑化過程に与える影響を調査し、以下の結論を得た。

- (1) 可視化観察結果より、飢餓供給時には満杯供給時に対して、ペレットがスクリュ溝内を充填する地点、および溶融開始する地点が下流側に移動すること、これらは飢餓率、スクリュ回転速度の増加にともない、より下流側に移動することが確認された。溶融が完了する地点は、低回転時には満杯供給とほぼ同じとなること、高回転時

には計量部でも溶融が完了せず、圧縮部から計量部にかけて SB の BUP が発生することが確認された。

- (2) 飢餓供給時には、樹脂ペレットは空隙をともなう圧縮部近傍まで輸送されることが確認された。このため、満杯供給時に見られる、ペレット凝集体およびシリンダとスクリュとの摩擦力の不均衡に起因する噛込み不良現象の回避が可能となることが示唆された。
- (3) 樹脂圧力は、ノズル部、計量部、圧縮部いずれも、同一スクリュ回転速度では満杯供給時よりも低く示された。同一飢餓率では、ノズル部と計量部では回転速度の増加にともない圧力の増加傾向が、圧縮部では減少傾向が示されることが確認されたが、飢餓供給の高回転時は、BUP 生成の影響によって、計量・圧縮部の圧力と回転速度の相関、また飢餓率との相関がいずれも低く示された。
- (4) 同一スクリュ回転速度でのノズル部、計量部の樹脂温度は、飢餓率によらずほぼ一定であること、同一飢餓率ではノズル部の樹脂温度は回転速度とともに上昇するが、計量部では回転速度によらずほぼ一定となることが示された。
- (5) 飢餓供給時の可塑化プロセスとして以下を提案した。樹脂ペレットは充填密度が低いまま供給部上流域を輸送され、個々に受熱し転がりながら供給部下流域で凝集する。圧縮部で表面が加熱されたペレットが凝集一体化する際に、高温のペレット界面を挟持・内包するため、短時間に溶融が完了する。この際、明確な MP の生成をともなわない。スクリュ低回転速度では効率的な溶融が行われるが、回転速度の増加によりプロセスは遅延して下流側にシフトし、溶融不良と SB の BUP 発現を招く可能性が高まる。

参 考 文 献

- 1) 横井秀俊, 高次 聡, 白石 亘: 生産研究, **52**, 410 (2000)
- 2) 横井秀俊, 高次 聡: 成形加工, **12**(7), 457 (2000)
- 3) 白岩信裕: *Journal of the Japan Society of Colour Material*, **78**(5), 233 (2005)
- 4) 浅野 強: 日本接着学会誌, **39**(11), 426 (2003)
- 5) Strand, S. R., Spalding, M. A. and Hyun, K. S.: *Plastics Engineering*, **48**(7), 17 (1992)
- 6) 横井秀俊, 龍野道宏: 成形加工, **13**(8), 571 (2001)
- 7) 横井秀俊, 龍野道宏: 成形加工, **14**(10), 678 (2002)
- 8) 横井秀俊, 岩崎龍一, 平野彰士, 鈴木謙克, 坂井秀敏: 成形加工'91, 15 (1991)